

CÂTEVA CONSIDERAȚII ISTORICE ASUPRA TEORIILOR DE REZISTENȚĂ

Garabet KÜMBETLIAN @ Alexandra NIȚĂ
kumbetg@yahoo.com

Abstract: This paper presents the chronological evolution of the main strength criterias. We show the manner which that criterias were experimental confirmed or infirmed.

Introducere

Este cunoscut faptul, că teoriile de rezistență au preocupat lumea științifică încă de la mijlocul secolului al nouăsprezecelea. Aproape toate teoriile de rezistență au fost introduse ipotetic (teoretic), fiind verificate (confirmate sau infirmate) ulterior, pe cale experimentală, cu o singură excepție și anume a teoriei I de rezistență, care s-a construit pe experimentele lui Galileo Galilei (1564–1642).

Teoria I, a tensiunii normale maxime

În anul 1638, a apărut, la editura Elzevirs din Leida (Olanda), lucrarea lui Galilei „*Discorsi e Dimonstrazioni matematiche intorno a due nuove scienze, attenti alia meccanica & movimenti locali*”, în care, printre alte rezultate obținute de autor, apar și cele ale încercărilor la întindere efectuate de el asupra coloanelor din piatră și marmură. În urma acestora, Galilei constata că la întindere, coloanele amintite se rupeau în secțiunea transversală a lor. De aici și

ideea lui William John Macquorn Rankine (1820–1872) de a considera (în anul 1860, la 222 de ani după apariția cărții lui Galilei), drept cauză a apariției stărilor limită, tensiunea normală maximă.

Este evident faptul, că teoria lui Rankine se verifica în condițiile experimentelor efectuate de Galilei, adică pentru piatră și marmură. Următoarele teorii au fost introduse ipotetic și verificate ulterior. La baza apariției lor au stat mai întotdeauna cauze reale și necesități practice, legate de folosirea unor materiale noi și de progresul tehnologic. Astfel, teoria a II-a de rezistență este legată în primul rând de numele lui Jean-Victor Poncelet (1788–1867).

Teoria a II-a, a deformației liniare maxime

Poncelet s-a născut într-o familie săracă din Metz. În anul 1807 a reușit cu succes la concursul de admitere de la École Polytechnique, unde a devenit studentul lui Monge. După absolvire (1810), a fost admis la școala de inginerie militară din Metz, iar după încheierea cursurilor ei (în anul 1812), a intrat în armata lui Napoleon. În timpul retragerii din Moscova (în noiembrie 1812) a fost luat prizonier, trăind ca atare timp de aproape doi ani la Saratov, pe malul Volgăi. Când a fost declarată pacea, Poncelet s-a întors în Franța, ocupând o poziție importantă în cadrul arsenalului din Metz. Arsenalul pune o mulțime de probleme importante cu specific mecanic, care-și așteptau răspunsuri și rezolvări. Având atât preocupări practice cât și teoretice, Poncelet a fost numit în anul 1825 profesor de mecanică la școala militară din Metz. În anul 1826 a apărut cartea sa „Cours de mécanique appliqué aux machines”. În această perioadă, Poncelet era preocupat de cauzele care ar produce fisuri și eventual distrugerea batiurilor din fontă solicitate la compresiune și țevilor de tun, în timpul tragerilor.

În controversa cu privire la alegerea rezistențelor admisibile, Poncelet a introdus teoria deformației maxime, susținând că apariția fisurilor coincide cu momentul în care deformațiile maxime ating o anumită valoare limită. În felul acesta, el a explicat și cauza rupei la compresiune a unor materiale casante sau fragile, ca

piatra și fonta, datorită fenomenului de *dilatare laterală*. Teoria deformației maxime a fost folosită mai târziu de Saint-Venant, fiind utilizată în mod exclusiv pe Continent, în timp ce autorii englezi continuau să se bazeze în calculele lor de proiectare pe teoria tensiunii normale maxime.

Teoria lui Poncelet a fost îmbrățișată de Barré de Saint-Venant (1797–1886). Saint-Venant s-a născut la castelul Fortoiseau (Seine-et-Marne), iar în anul 1813 (la numai șaisprezece ani) a fost admis la École Polytechnique, unde a devenit repede premiantul clasei din care făcea parte. Evenimentele politice ale anului 1814 au avut un efect important asupra carierei lui. În luna martie a aceluși an, armatele aliaților se apropiau de Paris, studenții de la École Polytechnique fiind mobilizați. La 30 martie 1814 aliații își îndreptau tunurile în direcția fortificațiilor Parisului, când Saint-Venant a declarat spre stupefacția tuturor, că *propria-i conștiință îi interzice să lupte pentru un uzurpator* (Napoleon). Ca urmare, a fost declarat dezertor și nu i s-a mai permis niciodată să-și reia studiile la École Polytechnique. Abia în anul 1823, guvernul i-a permis să fie admis la École des Ponts et Chaussées, fără concurs. După absolvirea școlii a lucrat un timp la construirea canalului de la Nivernais (1825–1830), iar mai târziu, a celui din Ardennes. În anul 1834 a prezentat două articole Academiei de Științe, unul din ele ocupându-se de câteva teoreme ale mecanicii teoretice. Datorită și acestor contribuții, în perioada 1837–1838 (în timpul bolii profesorului Coriolis), a fost solicitat să predea cursul de rezistența materialelor la École des Ponts et Chaussées.

În anul 1864 Saint-Venant și-a însușit teoria lui Poncelet și a definit tensiunea echivalentă corespunzătoare celei de-a doua teorii de rezistență, așa cum este cunoscută și folosită în zilele noastre. Această teorie a fost verificată experimental în anul 1900 de către August Föppl (1854–1924). A. Föppl s-a născut în localitatea Gross-Umstadt (ducatul Hessen), în familia unui doctor. În anul 1869 s-a înscris la Institutul Politehnic din Darmstadt, iar în 1871 s-a mutat la Stuttgart Polytechnicum, unde, printre alții, era profesor Otto Mohr.

În 1873 Föppl a părăsit și Stuttgartul, pentru a-și încheia studiile (în 1874) la Institutul Politehnic din Karlsruhe, unde preda

și Grashof. După efectuarea unor servicii temporare în domeniul proiectării podurilor la Karlsruhe, i s-a oferit (în anul 1876) un post de profesor la o școală profesională din Holzminden și apoi (în 1877) la Leipzig. În această perioadă a elaborat mai multe lucrări științifice și a proiectat și o clădire comercială în Leipzig.

În anul 1893 a murit la München profesorul J. Bauschinger, Föppl fiind ales să-l înlocuiască pentru următorul an. În felul acesta, Föppl a început să lucreze în laboratorul de mecanică, deja renumit, și care se bucura de o foarte înaltă reputație în lumea științifică. În anul 1898 a publicat un volum de Rezistența materialelor pentru studenți, foarte apreciat.

În cadrul încercărilor efectuate în laborator, în perioada anilor 1898–1900, a experimentat epruvete cubice de ciment la compresiune, semnalând importanța forțelor de frecare ce acționează pe fețele cubului în contact cu plăcile mașinii pentru încercări. A studiat diverse metode pentru reducerea acestor forțe, arătând că încercările uzuale ale epruvetelor cubice duc la valori exagerate ale rezistenței la compresiune. În cartea sa amintită mai sus, Föppl a folosit notațiile lui Saint-Venant, preferând teoria deformației maxime, pentru a deduce formulele pentru dimensionarea și verificarea structurilor. Föppl a mai efectuat încercări la compresiune sub presiuni hidrostatice mari. În felul acesta a demonstrat, că materialele izotrope pot suporta presiuni deosebit de înalte, în aceste condiții. El a mai proiectat și construit un dispozitiv special pentru încercarea la compresiune a epruvetelor cubice după două direcții perpendiculare, efectuând o serie întregă de încercări pe epruvete din ciment. Toate aceste rezultate au apărut în buletinele laboratorului, inițiate de Bauschinger și continuate de Föppl până la sfârșitul vieții sale. În felul acesta, teoria deformației maxime (a lui Poncelet și Saint-Venant) își primea confirmarea experimentală cuvenită.

Pe măsura folosirii din ce în ce mai mult a oțelului în construcții, a apărut necesitatea adoptării unor noi criterii în calculul de rezistență.

Teoria a III-a, a tensiunii tangențiale maxime

În anul 1865, francezul Henri-Édouard Tresca a recomandat drept criteriu pentru aprecierea momentului de apariție a stării limită, tensiunea tangențială maximă. Teoria s-a dovedit a fi corectă în cazul materialelor tenace (ca oțelul *moale* și mai târziu cuprul și aluminiul). Un merit deosebit în ce privește confirmarea acestei teorii, l-a avut Johann Bauschinger (1833–1839). J. Bauschinger s-a născut la Nürnberg. Lui îi revine meritul de a fi înființat în anul 1871 primul laborator pentru încercări de materiale din Germania, afiliat unei școli de ingineri (Institutul Politehnic din München) și folosind atât industriei, cât și activității de cercetare a corpului profesoral, precum și în scopul educării studenților, în procesul de învățământ. În momentul înființării laboratorului, Bauschinger era profesorul de mecanică al institutului. El a reușit să instaleze aici o mașină cu o capacitate de 100t (1000kN), proiectată de Ludwig Werder (1808–1885) în anul 1852, pentru Maschinenbaugesellschaft Nürnberg. Pentru măsurarea deformațiilor mici și elastice, Bauschinger a conceput un extensometru cu oglinzi, care-i permitea să măsoare cu acuratețe, deformații de ordinul a 10^{-6} m/m. În anul 1880, Bauschinger a confirmat experimental teoria lui Tresca, cu ajutorul unor încercări la răsucire efectuate asupra unor tuburi din oțel cu procent mic de carbon, solicitate la răsucire. Teoria lui Tresca era aplicabilă structurilor din materialele amintite mai sus, cu observația că în proiectare ducea la ușoare supradimensionări. Astfel a apărut necesitatea enunțării unor noi teorii de rezistență.

Teoria a IV-a, a energiei potențiale totale de deformație

Beltrami (în anul 1885) și Haigh (în anul 1890), au sugerat, că pentru determinarea valorilor critice ale solicitărilor compuse, ar trebui adoptată drept criteriu de cedare, valoarea energiei potențiale specifice de deformație totală, a materialului solicitat. Această teorie nu a confirmat rezultatele experimentale (ale lui Föppl), întrucât, de exemplu, materialul poate acumula o cantitate mare de energie de deformație, sub presiune hidrostatică uniformă, fără ca aceasta să

provoacă inițierea ruperii sau chiar a fenomenului de curgere. Altfel spus, energia potențială de variație a volumului, din energia potențială totală, corespunde unei întinderi sau compresiuni triaxiale, care nu duce la distrugerea materialului. Ca urmare, a apărut teoria a V-a de rezistență.

Teoria a V-a, a energiei potențiale de distorsiune

Descompunerea energiei de deformare în doi termeni (energia potențială corespunzătoare variației de volum și energia de distorsiune), se datorează lui Maxwell (1831–1879). Ținând cont de ideea lui Maxwell cu privire la componența energiei de deformare, polonezul M.T. Huber a „îmbunătățit” în anul 1904 teoria a IV-a de rezistență, prin luarea în considerație doar a energiei de distorsiune, ca fiind cea care determină starea critică la solicitări compuse.

Independent de Huber, Richard von Mises (1883–1953) a ajuns și el în anul 1913 la aceeași concluzie. Richard von Mises s-a născut la Lemberg (Lvov) în 1883. După absolvirea facultății a activat la Strassburg (până în 1918), Dresda și Berlin (până în 1933), Istanbul (până în 1939) și Boston (după o scurtă ședere la Cambridge).

Pentru verificarea acurateții teoriei energiei de distorsiune s-a depus un mare efort de muncă experimentală. Printre primii care au încercat să verifice teoria Huber-Mises, trebuie amintit Hencky (în anul 1924). La sugestia lui A.Nadai, W. Lode a efectuat în anii 1925–1926 încercări pe tuburi cu pereți subțiri din fier, cupru și nichel, solicitate la întindere și supuse unei presiuni hidrostatice interioare.

În felul acesta, Lode a obținut stări de tensiune bi-dimensionale, cu valori diferite ale raportului $\sigma_1 : \sigma_2$, tensiunea radială putând fi neglijată. Astfel a demonstrat, că punctele obținute experimental, s-au așternut cu suficientă acuratețe, în vecinătatea elipsei limită Huber-Mises.

Experimente similare au fost efectuate de M. Rós și A. Eichinger în anul 1936 în cadrul laboratorului de încercarea mate-

rialelor a Institutului Politehnic din Zürich, rezultatele confirmând din nou valabilitatea teoriei a V-a de rezistență.

G. Sachs a ajuns în anul 1928 la relația:

$$\tau_c = 0,5744\sigma_c \quad (1)$$

dintre tensiunea tangențială la curgere și limita de curgere pe o cale complet diferită. Se știe că sarcina la limita de curgere, în cazul unei epruvete monocristaline, depinde de orientarea cristalului. Considerând epruvetele policristaline ca sisteme de cristale distribuite haotic, neglijând efectele de margine ale cristalelor și considerând că toate cristalele suferă simultan efectul de curgere, Sachs a calculat relația dintre σ_c și tensiunea tangențială critică τ_{cr} , cu ajutorul metodei aproximative de medie. Pentru cristale cu structură cubică cu fețe centrate (aluminiiu, cupru, nichel), a găsit că:

$$\sigma_c = 2,238\tau_{cr} \quad (2)$$

Similar, pentru forfecare pură a găsit că

$$\tau_c = 1,293\tau_{cr} \quad (3)$$

și deci

$$\tau_c = 0,577\sigma_c \quad (4)$$

Ținând cont de acuratețea calculului lui, acestea coincid cu rezultatul teoriei energiei de distorsiune. Acest rezultat a fost extrapolat de Sachs și pentru cristalele cu structură cubică cu volum centrat (ca în cazul fierului). După cum se poate constata, lucrările lui Sachs au oferit o bază fizică pentru explicarea rezultatelor obținute anterior, acceptându-se ipoteza conform căreia, curgerea materialului ar începe în momentul în care energia de distorsiune acumulată pe unitatea de volum ar atinge o anumită valoare determinată, pentru fiecare material în parte.

G. I. Taylor și H. Quinney au modelat și ei în anul 1931 (la Londra) diferite stări bidimensionale de tensiune, pe baza solicitărilor compuse de întindere și răsucire aplicate asupra tuburilor din aluminiiu, cupru și oțel moale. În cazul primelor dintre aceste metale, ei au obținut coincidențe destul de bune între rezultatele lor experimentale și cele anticipate de teoria energiei de distorsiune.

În cele de mai sus nu am amintit nimic despre teoria de rezistență a lui Otto Mohr (1900), întrucât ea a fost infirmată de Theodor Kármán, în anul 1911 [10].

Secolul al XX-lea a fost extrem de favorabil studiului materialelor. Începutul lui a fost marcat de dezvoltarea teoriilor de curgere, odată cu apariția în anul 1913 a criteriului „von Mises” pentru materiale tenace și ductile (ca oțelul).

În anul 1952 apare criteriul Drucker-Prager pentru pământuri, roci stâncoase și beton, iar ulterior contribuția lui Büyüköztürk, care arată că încărcările ciclice conduc uneori și la un efect favorabil, prin ecruisarea materialelor tenace. Teoriile atomiste apar începând cu anul 1921, odată cu experimentele lui A.A. Griffith pe fire extrem de subțiri (de ordinul micrometrilor) din sticlă. Griffith arată că firele din sticlă cu diametre de 30 de ori mai mici decât ale părului uman (100 μm) suportă până la rupere tensiuni de 10 ori mai mari decât ale epurvetelor din oțel ((3300÷3400) MPa).

Fenomenul este cunoscut din antichitate, când grecii confecționau parâme pentru veliere din părul femeilor. Odată cu apariția materialelor noi (anizotrope și compozite) au apărut și criterii de rupere noi. Astfel, în 1950, R. Hill propune criteriul cunoscut pentru materiale anizotrope, pentru ca după 1960, când Tsai (și Azzi) întreprind experimente cu materiale compozite să se contureze criteriul Tsai-Hill acceptat astăzi.

După 1980, Poston Gilmore și Marcovev au formulat criterii de rupere bazate pe teoria catastrofelor și mecanica ruperii, care admit modificări bruște, în salturi ale stărilor unui sistem. Și efortul uman de a concepe materiale din ce în ce mai performante va continua. Și odată cu el, și cel al formulării unor criterii de rupere pentru acestea.

Bibliografie

- [1] Eschenauer, H., Olhoff, N., Schnell, W. *Applied Structural mechanics*, Springer Verlag Berlin – Heidelberg, 1997.
- [2] Galiano, Th. De., Rival, M., *Larousse in extenso* Dicționar. Inventatori și invenții, Ed. București, 2001.

- [3] Gould, P., *Introduction to Linear Elasticity*, Springer Verlag, New York, Berlin, Heidelberg, Tokyo, 1983.
- [4] Ieremia, M. *Elasticitate, Plasticitate, Neliniaritate*, Ed. Printech București, 1998.
- [5] Kumbetlian, G., Mândrescu, G., *Mecanica solidelor deformabile, Retrospectivă cronologică, 1452–1952*, Ed. ALMA Craiova, 2005.
- [6] Mișicu, M., *Mecanica Mediilor Deformabile*, Ed. Academiei București, 1972.
- [7] Posea, N. *Mecanică aplicată pentru ingineri*, Ed. Tehnică București, 1984.
- [8] Shames, I., Cozzareli, F., *Elastic and inelastic Stress Analysis*, Ed. Taylor&Francis, Washington, London, 1997.
- [9] Teodorescu, P.P., Ille, V., *Teoria elasticității și introducere în mecanica solidelor deformabile*, vol. I–III, Ed. Dacia, Cluj-Napoca, 1976–1980.
- [10] Timoshenko, St. P., *History of Strength of materials*, Dover Publications Inc., 1983.
- [11] Voinea, R., *Introducere în mecanica Solidului cu aplicații în inginerie*, Ed. Academiei Române, 1989.